

Einsatz des UP-Kaltdraht-Verfahrens und geregelter MSG-Prozesstechnik für die Herstellung von Rohren aus der hochwarmfesten Nickelbasislegierung Alloy 617

U. Reisgen, K. Willms, S. Jochindke

Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen University

office@isf.rwth-aachen.de

Abstract

Für die Herstellung längsnahtgeschweißter Rohre aus Alloy 617 wurden im Rahmen eines Ziel2.NRW-Forschungsprojektes Strategien für einen geregelten Metallschutzgas-Schweißprozess und für das Unterpulver-Kaltdraht-Schweißverfahren entwickelt, um wirtschaftliche Alternativen zum heute eingesetzten Wolfram-Inertgas-Schweißverfahren zur Verfügung zu stellen. Bei den Untersuchungen wurde den besonderen Anforderungen beim thermischen Fügen dieses Werkstoffes und den Randbedingungen bei der Fertigung von längsnahtgeschweißten Rohren für den Einsatz als Dampfleitungen in mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken Rechnung getragen. So kam eine fertigungsbedingte Steifflanken-Fugengeometrie an einem einseitig zugänglichen, 40 mm dicken Stumpfstoß zur Anwendung. Ferner wurden die Streckenenergien und die Brennerpositionen hinsichtlich der Vermeidung von Heißrissen, Bindefehlern oder Schlackeeinschlüssen optimiert und standen im Fokus der Untersuchungen.

1 Einleitung

Um in Zukunft den Wirkungsgrad von neu gebauten, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Dampfkraftwerken von derzeit etwa 45 % auf über 50 % steigern zu können, sollen bestimmte Rohrleitungen im Dampfkreislauf bei Drücken von bis zu 350 bar und Temperaturen über 700 °C betrieben werden können. Der Nickelbasiswerkstoff Alloy 617, respektive seine Variante Alloy 617mod, ist seit Mitte der 1990er Jahre für

die unter den gegebenen thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen stehenden Komponenten in den Fokus der Untersuchungen gerückt.

Den guten Hochtemperatureigenschaften von Alloy 617 steht jedoch eine eingeschränkte Schweißeignung gegenüber. Aufgrund seines großen Erstarrungsintervalls neigt dieser Werkstoff beim Schweißen zur Bildung von Heißrissen, weshalb eine möglichst geringe Wärmeeinbringung anzustreben ist.

Wie Untersuchungen gezeigt haben, bieten sich über das weit verbreitete Wolfram-Inertgas-Verfahren (WIG-Verfahren) hinaus auch das Unterpulver-Kaltdraht-Verfahren (UP-KD-Verfahren) sowie geregelte Metallschutzgas-Verfahren (MSG-Verfahren) an, welche bei geringer Streckenenergie eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit versprechen [1, 2, 3].

2 Ausgangssituation

2.1 Grundwerkstoff Alloy 617

Bei dem Werkstoff mit dem Gattungsnamen Alloy 617 handelt es sich um eine Nickelbasislegierung, die nach [4] mit dem Kurzzeichen NiCr23Co12Mo bzw. der Werkstoffnummer 2.4663 bezeichnet wird. Alloy 617 ist eine austenitische, nicht aushärtbare, mischkristallverfestigende Legierung mit großer Hochtemperaturfestigkeit sowie großer Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit im Bereich von 550 °C bis 1150 °C. In *Tab. 2* ist die chemische Zusammensetzung nach [5] dargestellt.

Dieser Werkstoff neigt aufgrund seines großen Erstarrungsintervalls und seiner geringen Wärmeleitfähigkeit bei der schweißtechnischen Verarbeitung zu Heißrissen, insbesondere bei dickwandigen Bauteilen mit hohen Schweißspannungen. Gleichzeitig kann der Abbrand bestimmter Legierungselemente im Schweißgut zu einer Verschlechterung der Langzeiteigenschaften bei erhöhten Temperaturen führen.

2.2 Cold Metal Transfer (CMT) Pulse-Verfahren

Bei dieser geregelten MSG-Schweißprozessvariante sind Kurzschluss- und Impulsphasen in einer alternierenden Folge kombiniert. Während der Kurzschluss-Phase erfolgt dabei die Tropfenablösung mit mechanischer Unterstützung, indem die Drahtelektrode einer schnellen Reversierbewegung unterzogen wird. Beim CMT-Verfahren werden die Kurzschlusszeitpunkte in Relation zur Drahtbewegung erfasst, sodass die zum Brenner relative Lage der Werkstückoberfläche abgetastet wird. Die Lichtbogenlängenregelung erfolgt über die Amplitude der Reversierbewegung. Beim CMT Pulse-

Verfahren wird die Lichtbogenlänge hingegen über die Spannung während der Impulsphasen gesteuert [6].

Des Weiteren erfolgt durch die elektrische Prozessregelung der Werkstoffübergang während der Kurzschlussphasen nahezu spritzerfrei. Das Verhältnis der Anzahl an CMT-Kurzschluss- und Impulszyklen kann vom Benutzer bei ansonsten nahezu konstanter Abschmelzleistung in weiten Bereichen variiert werden. Da somit die Prozessleistung direkt beeinflusst werden kann, eignet sich das Verfahren auch für Werkstoffe, die gegenüber Wärmeeinbringung sensitiv reagieren können.

2.3 Unterpulver-Kaltdraht (UP-KD)–Verfahren

In Abb. 1 a) ist das Verfahrensprinzip des Unterpulverschweißens und in Abb. 1 b) das des Unterpulver-Kaltdraht-Schweißens (UP-KD-Schweißen) schematisch dargestellt. Bei dem UP-KD-Verfahren wird der Kaltdraht von hinten dem Schmelzbad zugeführt. Eine Zuführung von Vorne ist bei diesem Verfahren nicht sinnvoll, da das Anstechen der Schweißkaverne zu Prozessstörungen führen kann, [1].

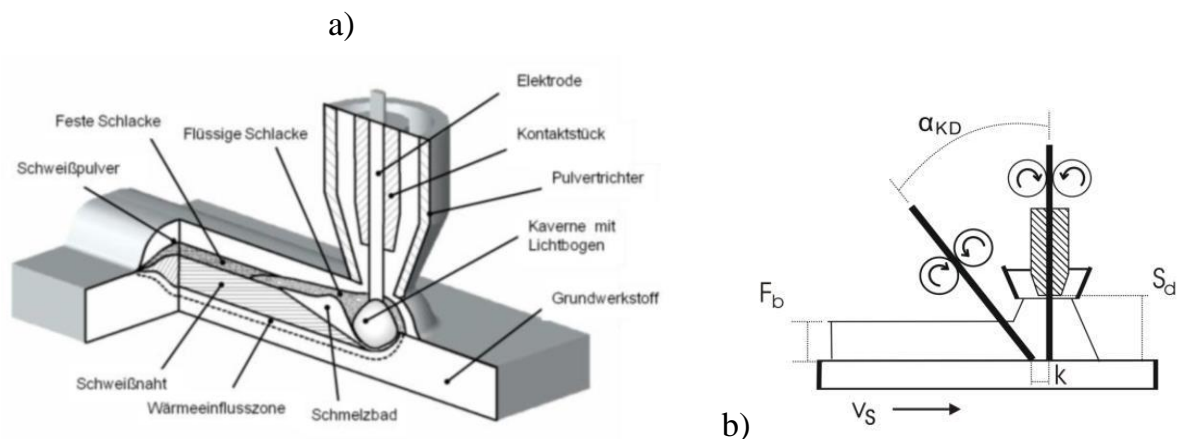


Abb. 1: a) Verfahrensprinzip des UP-Schweißens, b) Schematische Darstellung des UP-KD-Schweißens

Vorteil des UP-KD-Schweißens mit dünnen Drahtelektroden ist die im Verhältnis zur Streckenenergie hohe erreichbare Abschmelzleistung. Der stromlose Kaltdraht beeinflusst das Erstarrungsverhalten, beispielsweise die Dendritenwachstumsrichtung, und führt zu einer verbesserten Eignung zum Schweißen des heißrissgefährdeten Nickelbasiswerkstoffs, [2]. Der Abbrand von Legierungselementen (insbesondere Aluminium und Titan) kann ebenfalls reduziert werden, da der Kaltdraht nicht mit dem Lichtbogen in Kontakt tritt.

Ein besonderes Augenmerk liegt beim UP-KD-Schweißen auf der korrekten Positionierung des Kaltdrahtes in Relation zur Drahtelektrode. Bei ungünstiger Kaltdrahtanstellung kann zu viel nachlaufende Schlacke mit dem Kaltdraht in das Schmelzbad gezogen werden (Winkel α_{KD}). Der Kaltdraht sollte so nah wie möglich an der Drahtelektrode in das Schmelzbad gefördert werden, ohne dabei in den Lichtbogenraum zu gelangen (Abstand k). Der Kaltdraht kann sonst in die Schweißkaverne gelangen und den Schweißprozess stören. Hingegen setzt ein zu weit hinten positionierter Kaltdraht auf den festen Grund des Schmelzbades auf

3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Ausgehend von einer praxisrelevanten Fugengeometrie für Fülllagen an einem Längsnahtrohr, Außendurchmesser 508 mm, Wanddicke 40 mm, Abb. 2 a), wurden Fugen an Blöcken der Länge 150 mm nach Abb. 2 b) gefüllt. Bei der Fuge wurde vorausgesetzt, dass die Wurzel bereits mit dem WIG-Schweißverfahren gefertigt wurde. Um Verzug beim Schweißen zu minimieren, wurden die Blöcke auf Stahlunterlagen festgeschweißt. Es wurde eine Zwischenlagentemperatur von 100 °C eingehalten. Die einzelnen Raupen wurden vor dem Überschweißen gebürstet. Zur Bestimmung der Streckenenergie wurde die Prozessleistung transient gemessen und über einen Zeitraum von mindestens 10 Sekunden gemittelt. Bei den Schweißungen mit dem WIG-Kaltdraht-Schweißverfahren (WIG-KD), die zum Vergleich durchgeführt wurden, wurde ein Schutzgas ArH – 5 und bei den CMT Pulse-Versuchen ein Schutzgas Ar-HeHC – 30/2/0,12 verwendet. Für die UP-KD-Versuche fand das aluminatbasierte Pulver „Marathon 504“ des Herstellers voestalpine Böhler Welding Germany Anwendung.

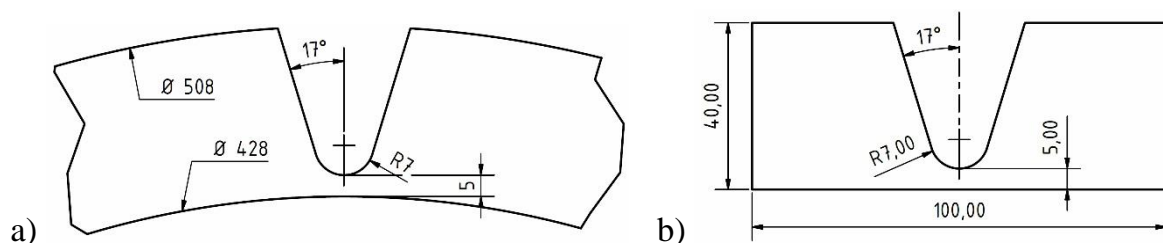


Abb. 2: Fugengeometrie für Fülllagen a) Längsnahtrohr b) Schweißproben

In *Tab. 1* sind die Parameter für die Verfahren WIG-KD, CMT Pulse und UP-KD für die Füllschweißungen aufgeführt. In *Abb. 3* sind Makro-Querschliffe der Prüfkörper dargestellt.

Tab. 1: Verfahrensparameter

Verfahren	Elektrorendurchmesser [mm]	v_D [m/min]	v_S [m/min]	U [V]	E_s [kJ/cm]	Abschmelzleistung [kg/h]
WIG-KD	1,2	1	0,15	15	9,0	0,57
CMT Pulse- MSG	1,0	9	0,50	21	4,4	3,56
UP-KD	1,6	4,5	0,70	35	7,5	5,70

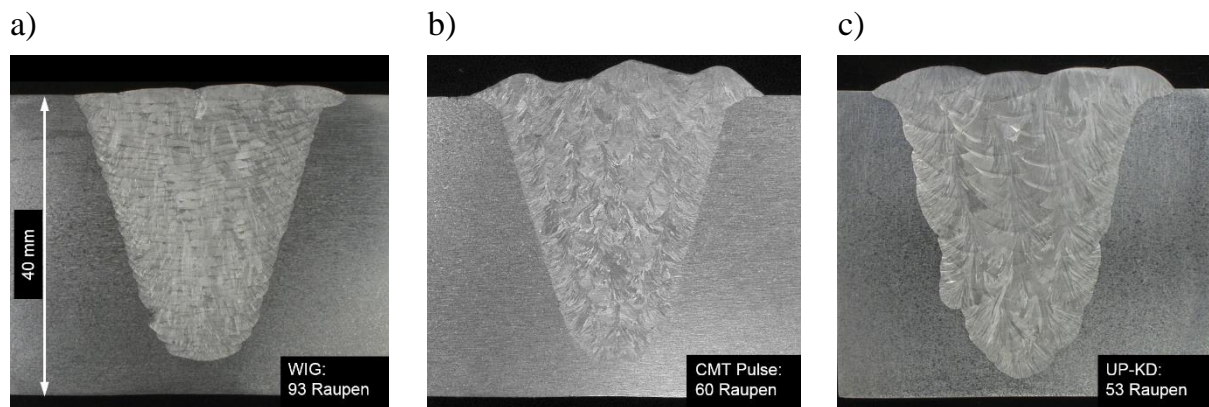


Abb. 3: Makro-Querschliffe der Füllschweißungen: a) WIG-KD, b) CMT Pulse, c) UP-KD

Beim CMT Pulse-Verfahren ergibt sich mit der Synergiekennlinie 0975+P bei der in *Tab. 1* genannten Abschmelzleistung eine Streckenenergie von 3,9 kJ/cm. Besonders die unteren Bereiche in der Fuge und die Flanken stellen kritische Bereiche für Bindefehler dar. Durch stechende oder schleppende Anstellung konnten die Flankenbindung, bzw. die Einbrandtiefe der Einzelraupen hinsichtlich der Vermeidung von Bindefehlern verbessert werden. Mit der auf ein Verhältnis von 4:8 geänderten Einstellung für CMT zu Impulszyklen wurde die Streckenenergie auf 4,4 kJ/cm erhöht, sowie der

Einbrand an den Raupenseiten verbessert, sodass keine Bindefehler auftraten. Bei Überschreiten einer Streckenenergie von lediglich etwa 5 kJ/cm konnten an den Fugen erste Heißrisse entdeckt werden. Dieser Wert liegt deutlich unter dem laut Werkstoffhersteller angegebenen Maximalwert der Streckenenergie von 8 kJ/cm.

Für das UP-KD-Schweißen liegt ein solcher Richtwert nicht vor. Versuche mit variablen Streckenenergien ergaben jedoch, dass an der relevanten Fuge Werte von 7,5 kJ/cm nicht überschritten werden dürfen, da sich sonst Spannungsrisse bilden können.

Mit dem WIG-KD-Verfahren ergibt sich bei dem dargestellten Parameter, der in Richtung hoher Abschmelzleistung entwickelt wurde, eine Schweißhauptzeit von 620 Minuten bezogen auf einen Meter Fugenlänge. Für die Verfahren CMT Pulse und UP-KD ergeben sich nur 120 bzw. 76 Minuten auf gleicher Länge. Des Weiteren ergeben sich durch hohe Streckenenergien längere Wartezeiten bis zur Einhaltung der Zwischenlagentemperatur. So ist die Nebenzeit beim WIG-KD-Schweißen durch lange Wartezeiten bestimmt. Demgegenüber sind die Nebenzeiten der anderen Verfahren durch das Entfernen der Schlacke (nur UP-KD) und das Bürsten der Oberflächen zur Entfernung von Spinellen bestimmt, da der Werkstoff währenddessen die Zwischenlagentemperatur unterschreitet.

Allen Verfahren gemeinsam ist die Notwendigkeit zur genauen Brennerpositionierung. Je kleiner das Schmelzbad und die Einbrandfläche sind, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit von Bindefehlern, respektive Schlackeeinschlüssen. Somit sind der Positionieraufwand und die damit verbundene Verlängerung der Nebenzeiten beim WIG-KD- und CMT Pulse-Schweißen größer als beim UP-KD-Schweißen. Da für das CMT Pulse-Schweißen neben der Queranstellung des Brenners an den Flanken auch Anstellungen längs zur Schweißrichtung notwendig sind, ist hier der Aufwand am größten.

Die Gefahr von Bindefehlern oder Schlackeeinschlüssen (nur UP-KD) ist in den unteren Lagen der Fuge jeweils am größten, da hier die Wärmeableitung durch umgebenes Material am größten und die Positionierung des jeweiligen Brenners am anspruchsvollsten sind. Beim UP-KD-Schweißen wurde daher die Kaltdrahtzufuhr in den unteren Lagen auf 10 % rel. begrenzt, und erst in höheren Lagen sukzessive auf 25 % rel. erhöht.

Die Schweißgüter wurden Blecheben abgefräst und an der Oberfläche mittels OES auf ihre chemische Zusammensetzung untersucht, *Tab. 2*. Bei dem CMT Pulse-Verfahren gab es unter dem gewählten Schutzgas keinen nennenswerten Abbrand von den für die

Langzeiteigenschaften wichtigen Legierungselementen. Die Verwendung von bis zu 25 % rel. Kaltdraht hat beim UP-KD-Schweißen noch nicht zu einer Zusammensetzung des Schweißgutes in den Grenzen der Herstellerangaben geführt.

Tab. 2: Nennzusammensetzung des Grundwerkstoffs nach Hersteller und OES-Analysewerte (ausgewählte Elemente).

	<i>Nennzusammensetzung Hersteller</i>		<i>Grundwerkstoff (GWS), Querschnitts- fläche</i>	<i>WIG-KD- Decklage</i>	<i>CMT Pul- se- Decklage</i>	<i>UP-KD Decklage</i>
	<i>Min</i>	<i>Max</i>				
<i>Fe</i>		<i>2,00</i>	<i>1,2</i>	<i>1,235</i>	<i>1,334</i>	<i>1,041</i>
<i>C</i>	<i>0,05</i>	<i>0,10</i>	<i>0,073</i>	<i>0,0528</i>	<i>0,0599</i>	<i>0,0444</i>
<i>Ti</i>	<i>0,20</i>	<i>0,50</i>	<i>0,3532</i>	<i>0,3209</i>	<i>0,3157</i>	<i>0,1892</i>
<i>Al</i>	<i>0,60</i>	<i>1,50</i>	<i>1,002</i>	<i>1,225</i>	<i>1,247</i>	<i>0,762</i>
<i>B</i>		<i>0,006</i>	<i>0,0017</i>	<i>0,0037</i>	<i>0,0038</i>	<i>0,0025</i>

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz der alternativen Schweißverfahren CMT Pulse und UP-KD versprechen gegenüber dem WIG-KD-Verfahren sowohl hinsichtlich der Schweißhauptzeiten als auch der Nebenzeiten deutlich wirtschaftlicher zu sein.

Allen Verfahren gemeinsam ist die Anfälligkeit gegenüber ungünstigen Elektrodenpositionierungen. Das UP-KD-Schweißverfahren kann nach sorgfältiger Kaltdraht-Positionierung zu Beginn der Schweißarbeiten und Einhaltung der Streckenenergie von 7,5 kJ/cm in einem stabilen Prozessfenster betrieben werden. Das CMT Pulse-Schweißverfahren erfordert durch seinen stark eingegrenzten Bereich für die Streckenenergie sowie die notwendigen Brenneranstellungen in mehrere Achsen die im Vergleich größte Sorgfalt.

Für das UP-KD-Schweißverfahren ergeben sich Abbrände der Elemente Kohlenstoff und Titan. Hier verspricht eine Schweißparameteranpassung jedoch nur noch geringe

Verbesserungen, [2]. Die Verwendung eines Kaltdrahtes mit einem angepassten Legierungsgehalt kann hier zu Verbesserungen führen.

Die entwickelten Schweißstrategien für den CMT Pulse-Schweißprozess und das UP-KD-Schweißverfahren werden Anfang 2015 bei der Fertigung eines 5 m langen Demonstratorrohres unter Praxisbedingungen Anwendung finden.

Beim Mehrlagenschweißen muss berücksichtigt werden, dass mit der Raupenanzahl schädliche Schweißeigenspannungen zunehmen. Über numerische Struktursimulationen an Rohrsegmenten nahezu identischer Geometrie, werden die mit den drei Verfahren entstehenden Schweißeigenspannungen betrachtet.

Literatur

- [1] Aretov, I.: Einfluss der Kaltdrahtzufuhr beim Unterpulverschweißen von hochwarmfesten Nickelbasiswerkstoffen. Dissertation, RWTH Aachen, 2009
- [2] Reisgen, U.: Untersuchung des Einflusses zusätzlicher Kaltdrahtzufuhr beim Unterpulverschweißen auf die Heißrissanfälligkeit von austenitischen Werkstoffen. Abschlussbericht DFG-Nr. 2755/13-1. Aachen, 2013
- [3] Zinke, M.: Schweißmetallurgische Untersuchung zum wärmereduzierten MAG-Verbindungsschweißen heißrissempfindlicher Ni-Basislegierungen. Abschlussbericht IGF 16.316 B, Magdeburg, 2012
- [4] Norm DIN 17744: Nickel-Knetlegierungen mit Molybdän und Chrom – Zusammensetzung. Ausg. 2.2002. Berlin: Beuth Verlag.
- [5] N.N.: Nicrofer 5520 Co – alloy 617 Werkstoffdatenblatt. Werdohl, Thyssen-Krupp VDM, 2005
- [6] N.N.: Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie. Fronius International GmbH, WEKA Media GmbH & Co. KG, Kissing 2013 – ISBN 978-3-8111-6879-4

Autorenanschriften

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Dipl.-Ing. Konrad Willms

Dipl.-Ing Stephan Jochindke

Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen

Institut für Schweißtechnik und Fertigungstechnik

Pontstraße 49

52062 Aachen

Telefon: 0241-80 93870

Telefax: 0241-80 92170

E-Mail: office@isf.rwth-aachen.de

Danksagung

Bei den vorgestellten Ergebnissen handelt es sich um Auszüge aus dem Projekt „Hochleistungsschweißtechnologien für die Herstellung und Verarbeitung von Rohren für 700 °C-Kraftwerke aus Nickelbasiswerkstoffen“. Für die Förderung im Rahmen des EFRE-Programmes /Ziel2.NRW durch die Europäische Union sei gedankt. Ausdrücklicher Dank gilt auch dem Projektkonsortium: Weltron Steuerungs- und Schweißanlagenbau GmbH, Bilfinger Piping Technologies GmbH, voestalpine Böhler Welding Germany GmbH, Eisenbau Krämer GmbH.

